

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.7

DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2017-2\(80\)-3-10](https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-3-10)**Я.М. Гаращенко, к.т.н., доц.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

Візуальна оцінка можливості раціональної орієнтації виробу при пошаровій побудові на установках адитивних технологій

Представлено розроблену підсистему візуальної оцінки тріангуляційних моделей, що входить до системи технологічної підготовки виготовлення складних виробів адитивними технологіями. Дана комп'ютерна система дозволяє оцінювати технологічність конструкції виробу та аналізувати ефективність його виготовлення з використанням адитивних технологій.

Запропоновано виконувати аналіз тріангуляційної моделі складного виробу шляхом колірної візуалізації її відображення на тріангуляційну модель сфери і завдання колірної шкали відповідності досліджуваній характеристиці граней. Умовою відображення на сферу є потрапляння значень кутів нахилу векторів нормалей граней тріангуляційної моделі виробу в сферичній системі координат в область значень певної трикутної грані моделі сфери.

Розглянуто приклади оцінки технологічності конструкції на основі аналізу сферичного відображення вихідної 3D моделі виробу. Запропонований підхід дозволяє істотно підвищити рівень інформативності при відпрацюванні конструкції та візуально визначати можливість раціональної орієнтації виробу у робочому просторі установки пошарової побудови.

Ключові слова: адитивні технології; технологічна підготовка; тріангуляційна модель; кольорова візуалізація; оцінка технологічності.

Постановка проблеми. Одним із шляхів підвищення продуктивності та економічності процесів пошарової побудови виробів на установках адитивних технологій (Additive Manufacturing) є визначення раціональної орієнтації виробу в робочій області побудови [7, 11, 14, 17]. Можливість вирішення технологічної задачі з визначення раціональної орієнтації істотно залежить від конструкційної (геометричної) складності виробу. Оцінка конструкції виробу на пристосованість до визначення раціональної орієнтації на етапах конструкційної та технологічної підготовки становить інтерес для забезпечення ефективності процесів пошарового виготовлення з використанням адитивних технологій.

Щодо адитивних технологій вихідною геометричною інформацією для виготовлення є тріангуляційна 3D-модель промислового виробу [6]. Тріангуляційна модель уніфікує представлення поверхні виробу, що створює передумови для аналізу системи трикутних граней.

Одним з напрямків досліджень, спрямованих на підвищення ефективності оцінки технологічності, вдосконалення конструкції і стратегії виготовлення адитивними технологіями є розвиток інструментів візуалізації (з використанням колірних шкал) величин досліджуваної ознаки безпосередньо на 3D-моделі виробу [5, 8].

В якості найбільш показної досліджуваної ознаки елементів (граней) тріангуляційної моделі з урахуванням робіт [1, 17] для візуального (колірного) аналізу був обраний кут нахилу грані щодо напрямку побудови. Дана досліджувана ознака є найбільш значущою з геометричних властивостей конструкції тому, що визначає для ділянки поверхні шорсткість і похибки формоутворення, потребу в підтримуючих структурах (як наприклад, для способів SLA і FDM) і в процесах постобробки. На етапі технологічної підготовки вибір кроку побудови визначається з урахуванням куту нахилу грані, а отже він впливає на одержувані фізико-механічні властивості матеріалу і час побудови виробу.

Кут нахилу грані щодо вектора напрямку побудови розраховується за коефіцієнтами одиничного вектора нормалі N_x , N_y , N_z . Величини коефіцієнтів N_x , N_y , N_z , як правило, представлені в вихідному STL-файлі. В іншому випадку вони визначаються за відомими залежностями [3] на основі координат вершин трикутної грані.

В роботі [4] представлено розроблену комп'ютерну підсистему колірної візуалізації тріангуляційних моделей. Ця підсистема передбачає список досліджуваних ознак, в якому також присутні напрямні косинуси (координати) векторів нормалей трикутних граней щодо осі Z (напрямку побудови). Недоліком такого візуального аналізу є недостатня наочність для достовірного аналізу. Особливо такий недолік явно виражений для складних за геометрією виробів. Це при тому, що переваги адитивних технологій ефективніше реалізуються для виробів зі складними топологією і геометричними формами. Тому кольорове відображення кутів нахилу векторів нормалей граней безпосередньо на 3D-моделі складного виробу не є достатнім для прийняття рішень на етапі технологічної підготовки



Викладення основного матеріалу. У даній роботі розглянуто наукову гіпотезу про те, що колірна візуалізація досліджуваної характеристики (відносної площі або кількості) трикутних граней моделі складного виробу, відображеного на тріангуляційну модель сфери за загальними ознаками орієнтації нормалей граней (кутів нахилу векторів нормалей в сферичній системі координат), може дозволити істотно підвищити рівень інформативності при оцінці придатності конструкції для раціональної орієнтації виробу в робочій області побудови і відповідно технологічності його виготовлення адитивними технологіями.

Мета роботи – вивчення можливостей візуальної оцінки технологічності конструкції виробу стосовно до задачі визначення раціональної орієнтації в робочій області побудови установки адитивних технологій.

Робота пов'язана з виконанням НДР Національного технічного університету «ХПІ»: «Підвищення точності виготовлення виробів селективним лазерним спіканням шляхом компенсації залишкових деформацій на етапі підготовки до матеріалізації» (ДР №0117U004882).

Дослідження виконувалось в підсистемі колірної візуалізації тріангуляційної моделі виробу, призначеної для відпрацювання його конструкції при вирішенні задач технологічної підготовки. Підсистема входить в систему технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними технологіями, розроблену на кафедрі «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семко НТУ «ХПІ». Дана система дозволяє оцінювати технологічність конструкції виробу та аналізувати ефективність використання адитивних технологій при його виготовленні.

При розробці підсистеми колірної візуалізації тріангуляційної моделі виробу вирішувалися такі основні завдання:

- оцінка коректності та раціональності тріангуляції CAD-моделі;
- відпрацювання конструкції на технологічність;
- візуальна оцінка можливості визначення раціональної орієнтації виробу в робочій області побудови.

Екранна форма підсистеми колірної візуалізації представлено на рис. 1. Підсистема дозволяє виконувати візуалізацію моделі за колірною шкалою і статистичний аналіз розподілу величин за вибраною ознакою.

Розроблена підсистема надає користувачеві наступні основні можливості завдання параметрів і режимів роботи з візуалізацією результатів:

- вибір досліджуваної ознаки із 14-ти характеристик, що пропонуються для аналізу моделі виробу з урахуванням робіт [15, 16];
- автоматичне формування колірної шкали при завданні кількості інтервалів та кольору для першого і останнього інтервалу;
- редагування інтервалів або вибіркове їх видалення в базі даних колірної шкали відповідності значенням досліджуваної ознаки;
- зміна кольору для кожного інтервалу значень окремо з використанням діалогового вікна вибору кольору;
- збереження кольорової моделі в форматі файлів PLY, AMF або для додаткового аналізу у вигляді таблиці даних в формат XLS (або в формат TXT при відсутності MS Excel);
- статистичний аналіз (визначення основних статистичних характеристик) і побудова гістограм розподілу досліджуваних ознак за кількістю або сумарною площею трикутних граней;
- запис результатів розрахунків в таблицю для порівняльного аналізу;
- збереження результатів статистичного аналізу в файл XLS-формату для подальшого аналізу з використанням стороннього програмного забезпечення;
- візуалізація результатів аналізу у вигляді щільності або інтегральної функції ймовірності (рис. 2).

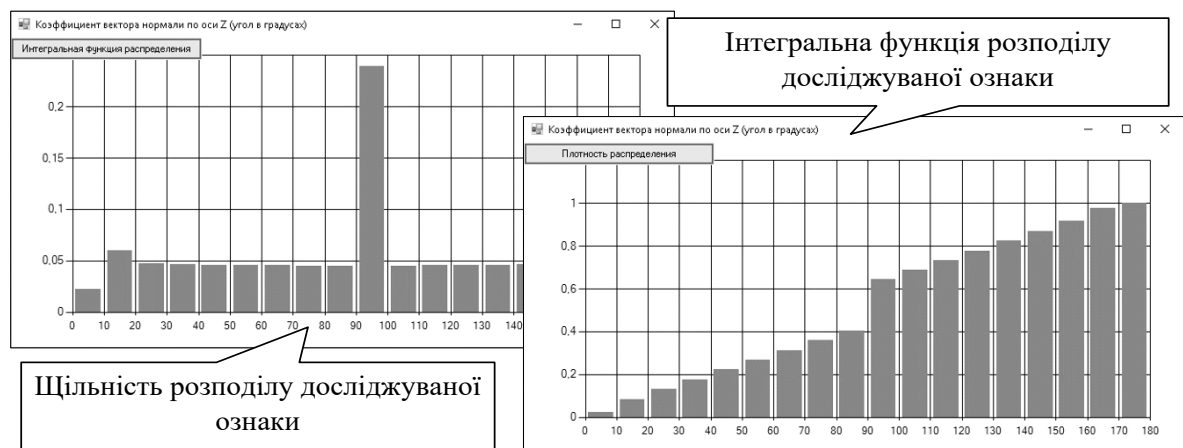


Рис. 2. Екранні форми з результатами аналізу досліджуваної ознаки у вигляді щільності або інтегральної функції ймовірності

Складність оцінки технологічності конструкції виробу щодо вирішення задачі раціональної орієнтації пов'язана з великою кількістю обмежуючих факторів [10, 12, 18]. Основною інформацією для визначення раціональної орієнтації виробу є коефіцієнти одиничних векторів нормалей граней триангуляційної моделі [1, 2].

Як приклад на рисунку 3 а представлена колірна візуалізація моделі виробу за коефіцієнтом N_z одиничних векторів нормалей граней. При технологічній підготовці така візуалізація пропонує необхідну інформацію для прийняття рішень щодо опорних структур і виконання постобробки.

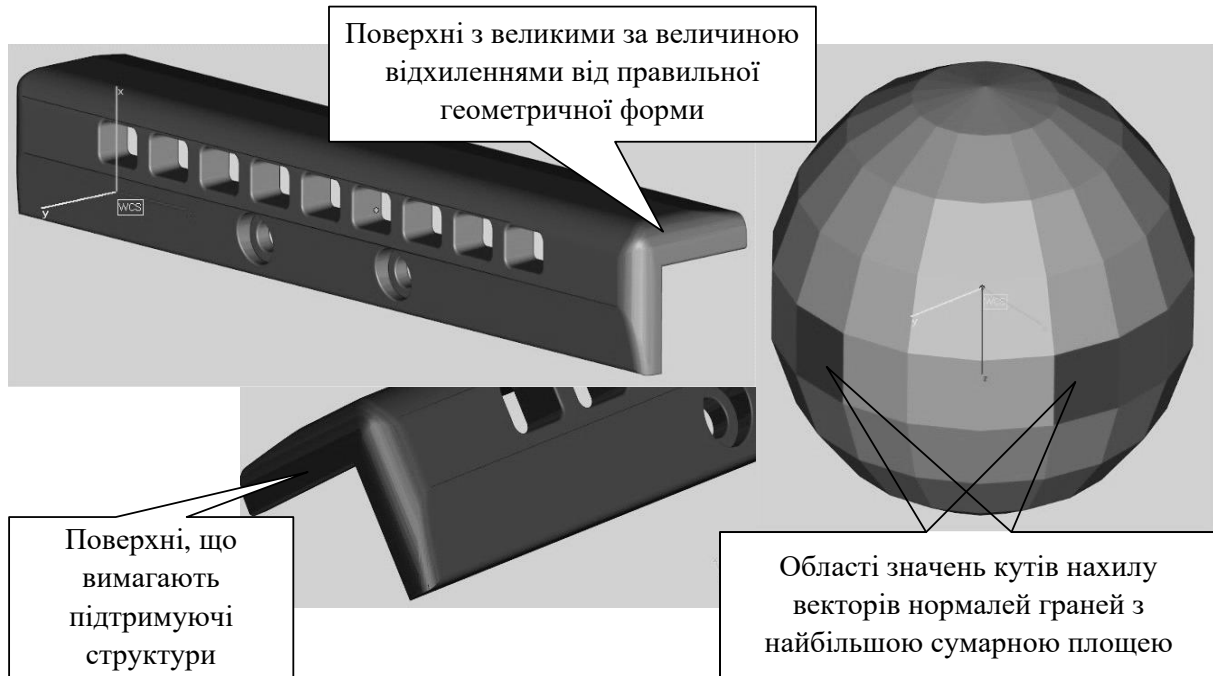


Рис. 3. Колірна візуалізація моделі виробу за коефіцієнтом одиничних векторів нормалей граней N_z (а) і відображенням на триангуляційну модель сфери (б)

Щодо пошарових способів виготовлення адитивними технологіями похилі поверхні виробу, у яких вектори нормалей нахилені під невеликим кутом до вектору напрямку побудови матимуть найбільш виражений «ступінчастий» вид. Тому найбільша шорсткість і відхилення від правильної форми поверхонь спостерігаються для граней, що мають кут між векторами їх нормалей і напрямку побудови (координатна вісь Z) в наступних інтервалах значень $N_z \in (0^\circ, 45^\circ)$ та $N_z \in (135^\circ, 180^\circ)$ [9]. Більш висока точність поверхонь досягається шляхом формування їх при обводі лазерним променем контуру в площині шару XY, тому найменші відхилення форми характерні для поверхонь, що мають $N_z \in (45^\circ, 135^\circ)$. Мінімальна величина відхилень буде при $N_z = 90^\circ$. Для ряду способів пошарового виготовлення (SLA, SLM, FDM і т. д.) «звисяючі» поверхні потребують створення підтримуючих структур [13]. До таких поверхонь відносяться грані, що мають $N_z \in (N_{z_min}, 180^\circ)$, де N_{z_min} – мінімальне значення кута нахилу вектора нормалі граней щодо напрямку побудови, що потребують підтримуючі структури. Залежно від способу виготовлення і первісного матеріалу для одержуваного виробу $N_{z_min} = 130^\circ \div 145^\circ$ [13].

Візуалізація за коефіцієнтом N_z (рис. 3 а) має обмеження при використанні на прикладі складних за формою виробів, що мають велику кількість поверхонь. Тому для зняття обмежень, що виникають через особливостей досліджуваної конструкції пропонується виконувати відображення на сферу моделі виробу (рис. 3 б) за наступною досліджуваною ознакою: площа граней або кількість граней. Умовою відображення на сферу є потрапляння значень кутів нахилу векторів нормалей граней триангуляційної моделі виробу в сферичній системі координат в область значень певної грані триангуляційної моделі сфери.

Перехід від коефіцієнтів N_x , N_y , N_z одиничного вектора нормалі i -й грані моделі виробу до кутів θ , φ в сферичній системі координат (θ , φ — зенітний і азимутальний кути відповідно) виконується за наступними залежностями [3]:

$$\theta = \arctg \left(\sqrt{N_{x(i)}^2 + N_{y(i)}^2} / N_{z(i)} \right), \quad \varphi = \arctg \left(N_{y(i)} / N_{x(i)} \right).$$

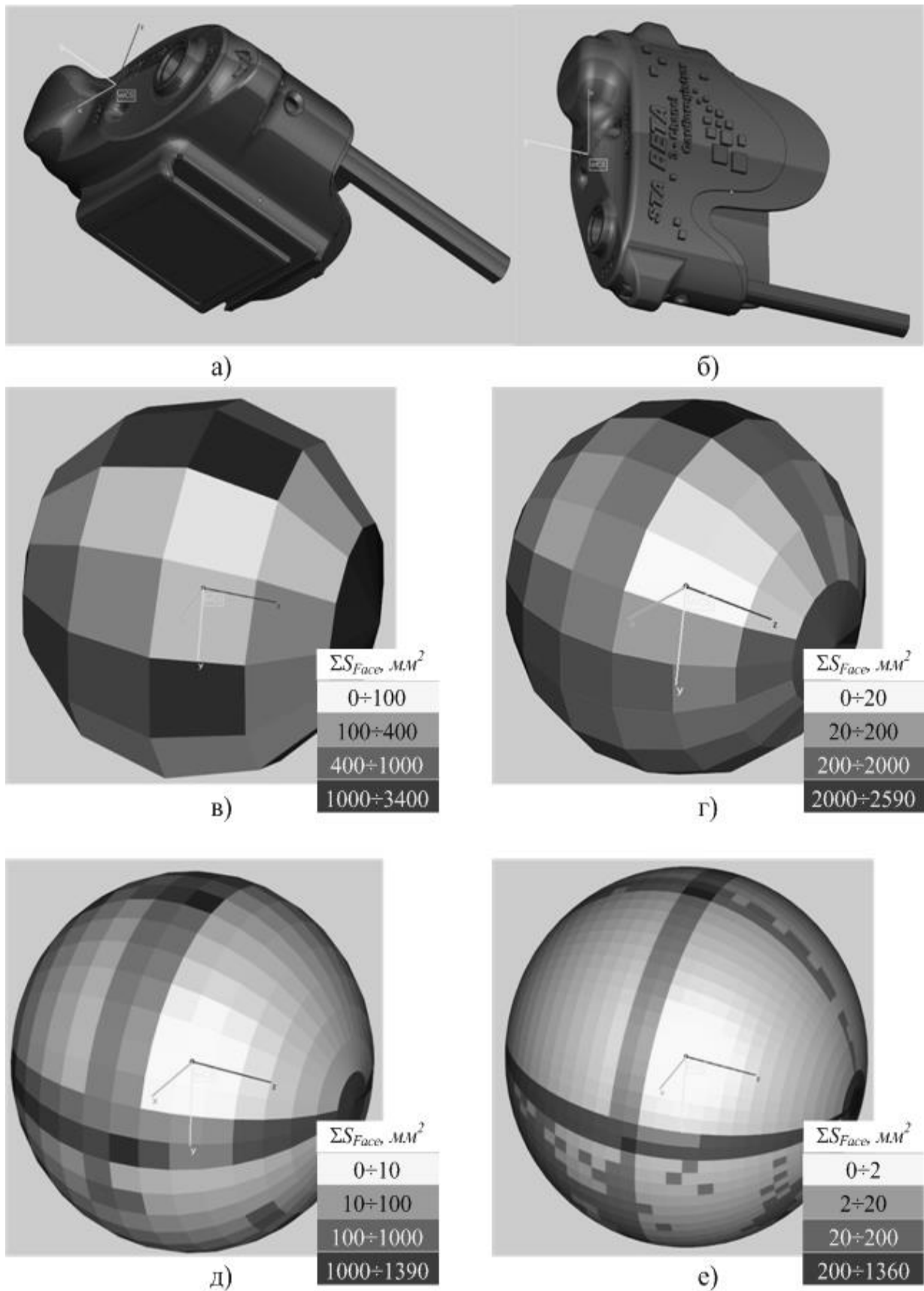


Рис. 4. Колірна візуалізація моделі кришки за коефіцієнтами одиничних векторів нормалей граней N_z (а) і N_y (б), відображенням на сферу сумарної площі граней при наступних інтервалах кутів нахилу вектора нормалі в сферичній системі координат: 30° (в), 20° (г), 10° (д), 5° (е)

Особливість триангуляційної моделі сфери, одержуваної в CAD-системах – це опис ребрами граней ліній «паралелей» і «меридіанів» з двома полюсами. Така особливість є зручною для визначення інтервалів кутів нахилу нормалі трикутної грані, необхідних для виконання відображення на сферу моделі виробу. Межі інтервалів значень кутів θ , φ для i -ї грані триангуляційної моделі сфери визначаються мінімальною і максимальною величиною координат вершин грані в сферичній системі координат. Координати θ , φ вершин грані для моделі сфери з початком системи координат в її центрі визначаються за наступними залежностями [3]:

$$\theta_j = \arctg\left(\sqrt{x_{v(j)}^2 + y_{v(j)}^2} / z_{v(j)}\right), \varphi_j = \arctg\left(y_{v(j)} / x_{v(j)}\right),$$

де $x_{v(j)}$, $y_{v(j)}$, $z_{v(j)}$ – координати j -ї вершини трикутної грані сфери в декартовій системі координат.

Недолік сфери з полюсами буде проявлятися при відображенні граней моделі виробу з нормаллями $|N_z| = 1$. В даному випадку для забезпечення відповідності площі моделі виробу і відображення на сферу при збереженні наочності аналізу необхідно створити виключення. При такому виключенні поверхні моделі з коефіцієнтом вектора нормалі $|N_z| = 1$ відображаються на триангуляційну модель сфери з рівномірним розподілом площі по гранях, що мають вершину у відповідному полюсі.

Отримане відображення моделі тестового виробу, представленого на рисунку 3, демонструє спрощення аналізу, що дозволяє істотно підвищити рівень наочності при оцінці придатності конструкції для раціональної орієнтації виробу в робочій області побудови.

Важливим є визначення раціонального ступеня деталізації відображення на сферу тобто кількості інтервалів значень для кутів θ , φ нахилу нормалей. Представлений приклад на рисунку 4 показує як збільшення кількості граней на триангуляційній моделі сфери дозволяє більш інформативно оцінювати складність конструкції. Але при цьому слід враховувати, що області значень кутів θ , φ , що визначають поверхні з низькою, високою точністю побудови або що потребують підтримуючих структур становлять приблизно $20^\circ \div 45^\circ$ [9, 13].

Тому для оцінки технологічності виробу, стосовно до задачі його раціональної орієнтації, доцільно використовувати триангуляційну модель сфери з інтервалом кутів $20^\circ \div 30^\circ$, які представлені на рисунку 4 в, г.

На рисунку 5 а представлена модель щелепи, обрана в якості прикладу досить складного виробу, що не має очевидного рішення задачі раціональної орієнтації. Візуальний аналіз такої моделі не дозволяє визначити раціональну орієнтацію в робочій області побудови. Відображення на сферу (рис. 5 б) демонструє високий рівень інформативності для визначення раціональної орієнтації.

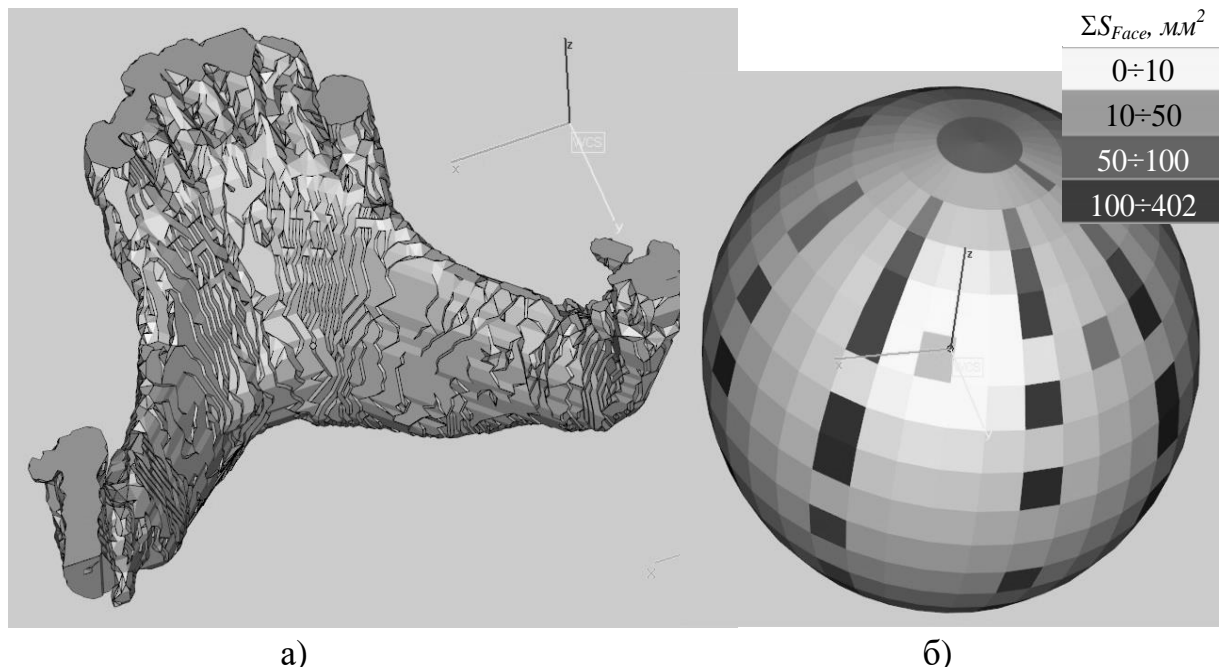


Рис. 5. Відображення на триангуляційну модель сфери моделі щелепи

Виконуючи орієнтування поверхонь з більшою площею таким чином, щоб нормалі їх граней мали мінімальне відхилення від площини побудови XY (кут $\angle N_z = 80^\circ \div 100^\circ$) становиться можливим можливе завдання раціональної орієнтації моделі щелепи з досить високою ефективністю реалізації пошарових способів побудови.

Висновки:

1. Колірна візуалізація за площею граней моделі складного виробу, відображеного на триангуляційну модель сфери, дозволило істотно підвищити рівень інформативності при оцінці придатності конструкції для раціональної орієнтації виробу в робочій області побудови. Умовою відображення на сферу є потрапляння значень кутів нахилу векторів нормалей граней моделі виробу в сферичній системі координат в область значень певної грані триангуляційної моделі сфери.

2. Представляється перспективним створення бази даних результатів візуальної оцінки конструкції (STL-файлів моделей виробів, PLY-файлів сферичного їх відображення), технологічних параметрів та показників ефективності виготовлення виробів. База даних створить інформаційні передумови для підвищення рівня технологічної підготовки до виготовлення складних виробів з використанням адитивних технологій.

Список використаної літератури:

1. Абдурайимов Л.Н. Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий путем морфологического анализа их 3D образа на этапе подготовки к материализации : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 / Л.Н. Абдурайимов. – Харьков : НТУ «Харк. пол. ин-т», 2012. – 264 с.
2. Витязев Ю.Б. Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 / Ю.Б. Витязев ; Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2004. – 228 с.
3. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – М. : АСТ : Астрель, 2006. – 991 с.
4. Доброскок В.Л. Совершенствование цветовой модели HSV для решения технологических задач / В.Л. Доброскок, А.В. Погарский // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М.Остроградського. – Вип. 2 (85). – Кременчук : КрНУ, 2014. – С. 85–90.
5. Доброскок В.Л. Использование цветовой визуализации топологических элементов моделей в учебном процессе / В.Л. Доброскок, Я.Н. Гаращенко, А.В. Погарский / Современные методы преподавания для студентов инженерных направлений : монография / под общ. ред. О.Н. Долининой. – Саратов : СГТУ, 2014. – 184 с. ; С. 96–104.
6. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, А.И. Грабченко, С.И. Чернышов и др. ; под ред. Л.Л. ТОВАЖНЯНСКОГО, А.И. Грабченко. – Харьков : ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с.
7. Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography / W.Cheng, J.Y.H. Fuh, A.Y.C. Nee, Y.S. Wong, H.T. Loh, T.Miyazawa // Rapid Prototyping Journal. – 1995. – Vol. 1, No. 4. – Pp. 12–23. – Access mode : <http://dx.doi.org/10.1108/13552549510104429>.
8. Barnawal P. Design and evaluation of feedback system in design for manufacturability : graduate theses and dissertations : spec. 14789 / P.Barnawal. – 2015. – Access mode : <http://lib.dr.iastate.edu/etd/14789>.
9. Daekeon A. Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing / A.Daekeon, K.Hochan, L.Seokhee // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – Vol. 47, Issues 3–4. – 2007, march. – Pp. 593–606. – Access mode : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.004>.
10. Automated manufacturability analysis: a survey / S.K. Gupta, D.Das, W.C. Regli, D.S. Nau // Research in Engineering Design. – 1997. – Vol. 9 (3). – Pp. 168–190. DOI: 10.1007/BF01596601.
11. Hong S. Byun Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing / S.Byun Hong, H.Lee Kwan // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2006. – No. 28. – Pp. 307–313. DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5.
12. Kulkarni P. A Review of Process Planning Techniques in Layered Manufacturing / P.Kulkarni, A.Marsan, D.Dutta // Rapid Prototyping Journal. – 2000. – Vol. 6 (1). – Pp. 18–35. DOI: 10.1108/13552540010309859.
13. Kumke M. A new methodological framework for design for additive manufacturing / M.Kumke, H.Watschke, T.Vietor // Virtual and Physical Prototyping. – 2016. – Vol. 11, Iss. 1. – Pp. 3–19. – Access mode : <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1139377>.
14. Pandey P.M. Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria Genetic Algorithm / P.M. Pandey, K.Thirimurtulu, N.V. Reddy // Int. J. of Production Research. – 2004. – Vol. 42, No. 19. – Pp. 4069–4089. – Access mode : <http://dx.doi.org/10.1080/00207540410001708470>.
15. Ranjan R. Design for manufacturability in additive manufacturing using a graph based approach / R.Ranjan, R.Samant, S.Anand // ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference / American Society of Mechanical Engineers. – 2015. – Pp. 1–10. DOI: 10.1115/MSEC2015-9448.
16. Shwe P.S. Quantitative analysis on SLS part curling using EOS P700 machine / P.S. Shwe // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212. – Pp. 2433–2442. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.012.
17. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K. Nagpal // Computer-Aided Design & Applications. – 2005. – Vol. 2, No. 1–4. – Pp. 319–328. – Access mode : <http://dx.doi.org/10.1080/16864360.2005.10738380>.
18. Evaluating the design for additive manufacturing: a process planning perspective / Y.Zhang et al. // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 21. – Pp. 144–150. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.179.

References:

1. Abdurajymov, L.N. (2012), *Povysheniye effektivnosti yntegrirovannykh technology poslojnogo vyrashhyvaniya yzdeley putem morfologicheskogo analiza yh 3D obraza na etape podgotovky k materyalizatsyy*, dyss. kand. tehn. nauk, spec. 05.02.08, NTU «Hark. pol. yn-t», Har'kov, 264 p.
2. Vytjazev, Ju.B. (2004), *Rasshyreniye tehnologicheskikh vozmozhnostey uskorennoy formoobrazovaniya sposobom stereolytografyy*, dyss. kand. tehn. nauk, spec. 05.02.08, Natsional'nyy tehnycheskiy unyversytet «Har'kovskiy polytehnycheskiy ynstitut», Har'kov, 228 p.
3. Vygodskiy, M.Ja. (2006), *Spravochnik po vysshej matematyke*, AST, Astrel', Moskva, 991 p.
4. Dobroskok, V.L. and Pogarskiy, A.V. (2014), «Sovershenstvovaniye svetovoy modeli HSV dlya resheniya tehnologicheskikh zadach», *Visnyk Kremenchuc'kogo natsional'nogo universytetu im. M.Ostrogradskogo*, Vol. 2 (85), KrNU, Kremenchuk, pp. 85–90.
5. Dobroskok, V.L., Garashhenko, Ja.N. and Pogarskiy, A.V. (2014), *Yspolzovaniye svetovoy vyzualizatsyy topologicheskikh elementov modeley v uchebnom processe, Sovremennyye metody prepodavaniya dlya studentov ynzhepernykh napravleniy*, monografiya, in Dolynyna, O.N. (ed.), SGTU, Saratov, 184 p., pp. 96–104.
6. Tovazhnijskiy, L.L., Grabchenko, A.Y., Chernyshov, S.Y. and others (2005), *Yntegrirovannyye technology uskorennoy prototypirovaniya y yzgotovleniya*, in Tovazhnijskiy, L.L. and Grabchenko, A.Y. (ed.), OAO «Model' Vseleynoy», Har'kov, 224 p.
7. Cheng, W., Fuh, J.Y.H., Nee, A.Y.C., Wong, Y.S., Loh, H. and Miyazawa, T. (1995), «Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, No. 4, pp. 12–23, available at: <http://dx.doi.org/10.1108/13552549510104429>
8. Barnawal, P. (2015), *Design and evaluation of feedback system in design for manufacturability*, graduate theses and dissertations, spec. 14789, available at: <http://lib.dr.iastate.edu/etd/14789>
9. Daekeon A., Hochan, K. and Seokhee, L. (2007), «Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, Issues 3–4, pp. 593–606, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.004>
10. Gupta, S.K., Das, D., Regli, W.C. and Nau, D.S. (1997), «Automated manufacturability analysis: a survey», *Research in Engineering Design*, Vol. 9 (3), pp. 168–190, DOI: 10.1007/BF01596601
11. Hong, S.B. and Kwan, H.L. (2006), «Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, No. 28, pp. 307–313, DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5
12. Kulkarni, P., Marsan, A. and Dutta, D. (2000), «A Review of Process Planning Techniques in Layered Manufacturing», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 6 (1), pp. 18–35, DOI: 10.1108/13552540010309859
13. Kumke, M., Watschke, H. and Vietor, T. (2016), «A new methodological framework for design for additive manufacturing», *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 11, Iss. 1, pp. 3–19, available at: <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1139377>
14. Pandey, P.M., Thrimurtullu, K. and Reddy, N.V. (2004), «Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria Genetic Algorithm», *Int. J. of Production Research*, Vol. 42, No. 19, pp. 4069–4089, available at: <http://dx.doi.org/10.1080/00207540410001708470>
15. Ranjan, R., Samant, R. and Anand, S. (2015), «Design for manufacturability in additive manufacturing using a graph based approach», *ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, pp. 1–10, DOI: 10.1115/MSEC2015-9448
16. Shwe, P.S. (2012), «Quantitative analysis on SLS part curling using EOS P700 machine», *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 2433–2442, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.012
17. Singhal, S.K., Pandey, A.P., Pandey, P.M. and Nagpal, A.K. (2005), «Optimum part deposition orientation in stereolithography», *Computer-Aided Design & Applications*, Vol. 2, No. 1–4, pp. 319–328, available at: <http://dx.doi.org/10.1080/16864360.2005.10738380>
18. Zhang, Y. and others (2014), «Evaluating the design for additive manufacturing: a process planning perspective», *Procedia CIRP*, Vol. 21, pp. 144–150, DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.179

Гарашенко Ярослав Миколайович – кандидат технічних наук, докторант кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- адитивні технології;
- зворотній інжиніринг;
- моделювання алмазно-абразивних інструментів.

Тел.: (067) 189–20–05.

E-mail: yaroslav.garashchenko@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 12.07.2017.